

Cambio en las emisiones de compuestos orgánicos volátiles en ambientes urbanos: múltiples vías para obtener un aire más limpio

por Isobel Simpson¹ y Claudia Volosciuk²

La contaminación atmosférica representa el mayor riesgo medioambiental para la salud humana. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), esta contaminación causa más de 4 millones de muertes cada año, principalmente en los países en desarrollo (WHO, 2019). A pesar de que la calidad del aire ha mejorado en muchos países en respuesta a las estrategias efectivas de control de emisiones, en otras partes del planeta aún sigue observándose un importante deterioro. Más del 90 % de la población mundial vive en ciudades que incumplen las directrices de calidad del aire de la OMS, a lo que se añade que las zonas del planeta más contaminadas a menudo tienen un menor número de sistemas de vigilancia y alerta de la calidad del aire (WHO, 2016; Kumar y otros, 2018). Las estrategias para mejorar la calidad del aire requieren un detallado conocimiento de los componentes contaminantes y de cómo evolucionan sus emisiones con el tiempo.

El papel de los compuestos orgánicos volátiles en los entornos urbanos

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) forman parte de la contaminación atmosférica e incluyen una compleja combinación de cientos de gases que contienen carbono (Lewis y otros, 2000). La tabla 1 relaciona algunos de los COV más importantes y comunes en muchas ciudades. Si las concentraciones en la atmósfera exceden los límites recomendados, los riesgos para la salud implican exposición a COV puros y a agentes contaminantes secundarios formados por reacciones químicas entre los COV y otros componentes. Por ejemplo, los COV

reaccionan con óxidos de nitrógeno para formar ozono y partículas ultrafinas, componentes del smog que afectan a la salud humana, la vegetación y el clima (OMS, 2018).

Las medidas y modelos globales muestran que los niveles de ozono en la superficie superan los límites recomendados en muchas zonas del planeta, especialmente en Asia (figura 1). La oxidación de los COV también favorece la formación de aerosoles orgánicos secundarios, que constituyen un importante manantial de partículas finas en suspensión o $PM_{2.5}$ (Gentner y otros, 2017; Guo y otros, 2017). La exposición a las $PM_{2.5}$ representa otro grave problema que afecta a la salud pública (OMS, 2013). Teniendo en cuenta que la producción de ozono y aerosoles orgánicos secundarios depende de la concentración relativa de sus COV y óxidos de nitrógeno precursores, las estrategias de reducción de emisiones requieren un enfoque integrado que considere la interacción entre los múltiples componentes de los contaminantes atmosféricos (Lyu y otros, 2016; Zhao y otros, 2017). La identificación de qué COV reactivos son más propensos a la formación de ozono y aerosoles orgánicos secundarios, y de cuáles son las fuentes principales responsables de sus emisiones, constituyen el objetivo principal del estudio de la contaminación atmosférica.

Éxitos y modificación de las huellas de los compuestos orgánicos volátiles

Las emisiones urbanas de COV a menudo están constituidas por una mezcla compleja de residuos del tráfico, la industria, los disolventes, la combustión de desechos y otras fuentes. Las emisiones de los COV naturales de plantas y árboles también contribuyen a la mezcla de los COV urbanos pues cada una de estas fuentes libera COV que presentan una marca característica o huella.

1 Departamento de Química, Universidad de California-Irvine

2 Secretaría de la OMM

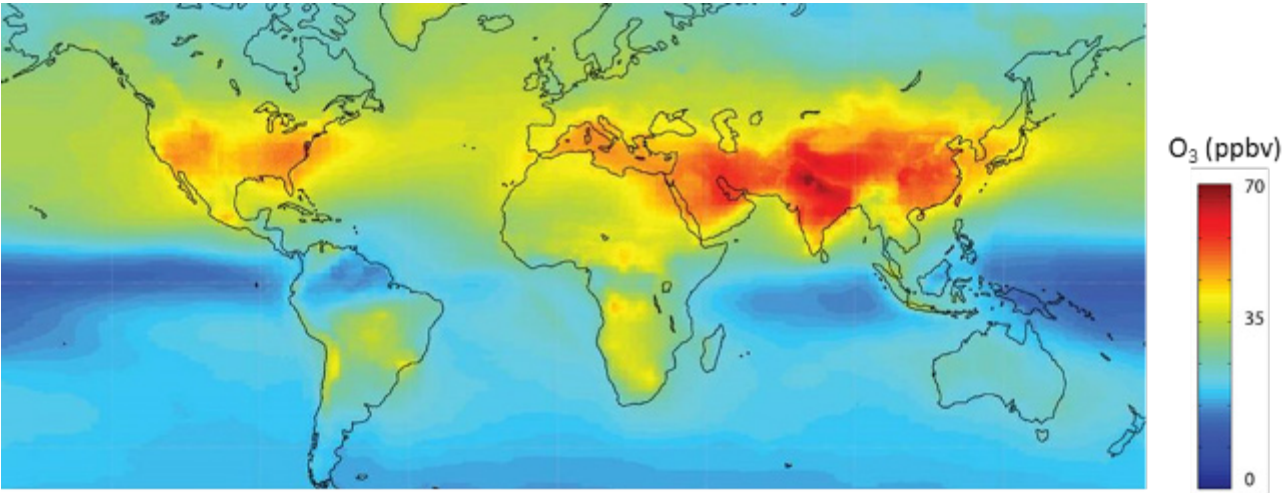


Figura 1. Los COV son precursores de los niveles de ozono superficial (O_3), componente esencial del smog. Esta gráfica muestra las concentraciones de ozono en superficie en 2010 (la media anual del máximo diario en 8 horas, en partes por mil millones (ppb)), basadas en modelos de transporte químico, con los mayores niveles de ozono en color rojo (Anenberg y otros, 2018). La OMS recomienda un límite de ozono de 50 ppb para una media en 8 horas. (Fuente: reproducido de Environmental Health Perspectives con permiso de los autores).

Compuesto	Tiempo de vida en la atmósfera (aprox.)	Fuentes características
Etano	1,5 meses	Gas natural, quema de biomasa
Acetileno	15 días	Emisiones de vehículos, quema de biomasa
Metanol	12 días	Plantas, oxidación de COV
Propano	11 días	Gas de petróleo licuado, gas natural
Benceno	10 días	Emisiones industriales, emisiones de vehículos, quema de biomasa
iso/n-Butano	5 días	Emisiones de vehículos, gas de petróleo licuado
Etanol	4 días	Plantas, biocombustible
iso/n-Pentano	3 días	Emisiones de vehículos, evaporación de gasolina
Tolueno	2 días	Disolventes, emisiones de vehículos
Etileno	1 día	Emisiones de vehículos
Formaldehído	1 día	Oxidación COV, quema de biomasa
Isopreno	3 horas	Plantas

Tabla 1. COV frecuentes en ambientes urbanos con sus tiempos de vida aproximados en la atmósfera y sus fuentes características. Los compuestos están ordenados por sus tiempos de vida atmosféricos. Las especies más persistentes, como el etano y el propano, son menos reactivas y por tanto más lentas para la formación de productos secundarios como el ozono.

Por ejemplo, el isopreno es un COV característico emitido por árboles de hoja ancha, mientras que el etileno es un producto de combustión asociado con los escapes de los vehículos (tabla 1). Por esta razón cada ciudad tiene una única huella de COV que refleja sus principales fuentes. Esta huella evoluciona con el tiempo de forma que los niveles de COV aumentan o disminuyen en respuesta a cambios en las fuentes o a las regulaciones medioambientales.

Por ejemplo, el tráfico es la principal fuente de COV urbanos. Sin embargo, las tecnologías para el control de emisiones de los vehículos, como los convertidores catalíticos, han reducido los niveles de COV en muchas zonas del planeta, especialmente en Europa, América del Norte y partes de Asia (Chang y otros, 2017). Debido a esta tecnología, en muchos países los vehículos actualmente emiten aproximadamente solo un 1 % de COV comparado con las emisiones de hace 50 años (Parrish

y otros, 2016). Como resultado, los niveles de COV y ozono han disminuido de forma constante en muchas ciudades industrializadas en los últimos 50 años, a pesar del aumento de ventas de combustible y del parque móvil de vehículos (figura 2). Por ejemplo, los niveles de COV han disminuido casi dos órdenes de magnitud en Los Ángeles desde 1960 como consecuencia de la pronta implementación de medidas de reducción de emisiones (Warneke y otros, 2012). De forma análoga, los niveles de COV en Londres han disminuido rápidamente desde la década de 1990 en respuesta a las estrategias de reducción de emisiones (von Schneidmeyer y otros, 2010).

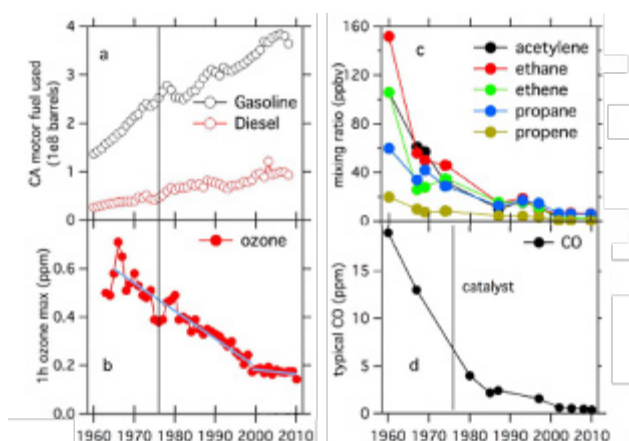


Figura 2. Tendencia desde 1960 de: a) las ventas de combustible en California, b) los niveles de ozono máximos en 1 hora en la cuenca de Los Ángeles, c) los COV seleccionados cerca del centro de Los Ángeles y d) el monóxido de carbono (CO) en el centro de Los Ángeles (Warneke y otros, 2012). (Fuente: reproducido de Journal of Geophysical Research con permiso de los autores).

Otra estrategia para mejorar la calidad del aire en las ciudades es la sustitución del combustible. Por ejemplo, muchas de ellas han cambiado sus sistemas de transporte público, desde taxis y autobuses de combustibles diésel por otros de combustibles más limpios como el gas de petróleo licuado (GPL) o el gas natural comprimido (GNC), o alternativas que no contienen combustibles fósiles como la energía eléctrica. Los combustibles diésel emiten COV más pesados, como el octano y el tolueno, mientras que los combustibles más limpios contienen hidrocarburos más ligeros como el propano y el butano en el caso del GPL, y el metano y el etano en el caso del GNC (Kado y otros, 2005; Guo y otros, 2011; Gentner y otros, 2017). Por tanto, la sustitución del combustible puede modificar la huella de COV de una

ciudad hacia una con hidrocarburos más ligeros, que son menos reactivos y, por tanto, ralentizan la formación de ozono. Por ejemplo, la huella de COV en Hong Kong, China, ha pasado de ser rica en tolueno a ser rica en butano al reemplazarse el diésel por GLP en taxis y autobuses ligeros, y al limitarse los niveles de tolueno en docenas de productos disolventes (Guo y otros, 2017; Lyu y otros, 2017).



Muestreo del aire en una quema en un vertedero cerca de La Meca (Arabia Saudita).

Dado que las emisiones originadas por el tráfico han disminuido en muchas ciudades, otras fuentes de COV están emergiendo con relativa importancia. Actualmente se estima que los productos químicos volátiles (como pesticidas, barnices y tintas, agentes limpiadores y productos cosméticos) componen la mitad de las emisiones de COV de combustible fósil en los Estados Unidos de América y en Europa (McDonald y otros, 2018). Los marcadores para estos productos incluyen COV como etanol, acetona y tolueno, y los COV emitidos pueden ser importantes precursores de aerosoles orgánicos secundarios. Por esta razón, en ciudades con controles efectivos de emisiones de vehículos cada vez es más importante comprender el papel de las fuentes de COV ajenas al tráfico en la formación de ozono y de aerosoles orgánicos secundarios.

Desafíos actuales y soluciones

Aunque algunas zonas del planeta han reducido con éxito sus emisiones de COV, aún quedan bastantes desafíos. Muchos países están aún en fases tempranas de establecimiento de normas de calidad del aire y marcos reguladores efectivos. Además, grandes áreas del planeta –muchas de las cuales experimentan una grave contaminación de ozono y partículas– están aún poco



Hong Kong, China, en un día de esmog y en un día claro (licencia bajo Creative Commons). Las medidas para la reducción de emisiones en muchas ciudades tratan de aumentar los días de “cielo azul”.

estudiadas. Resulta fundamental contar con sólidos programas de vigilancia de la calidad del aire para comprender la huella de los COV de cada ciudad y su evolución con el tiempo.

Mientras se crea la capacidad de medición, ciertos estudios de campo puntuales y limitados pueden ofrecer una valiosa información para orientar la política. Por ejemplo, durante una breve campaña de campo se puso de relieve que el aire en Lahore (Pakistán), una de las ciudades más contaminadas del mundo, era el más rico en etileno y acetileno, que son marcadores característicos del escape de vehículos (Barletta y otros, 2017). En contraste, el aire en La Meca (Arabia Saudita), tenía unos niveles inesperadamente altos de isopentano, un marcador de la evaporación de la gasolina, y también de marcadores del escape de vehículos (Simpson y otros, 2014). Por lo tanto, además de crearse estándares de emisión para los vehículos en La Meca, se ha recomendado una tecnología simple para reducir la evaporación de la gasolina, como agregar un recuperador de vapor a las mangueras de la bomba de combustible para reducir las emisiones de COV y la exposición a los gases mientras se reabastecen los vehículos. De esta manera, las estrategias de reducción de emisiones se pueden adaptar a cada ciudad de acuerdo con su única huella COV.

En otras regiones que cuentan con programas de vigilancia de la calidad del aire se ha encontrado una

compleja relación entre el aumento de las emisiones de COV en algunos sectores y la reducción de emisiones en otros. Por ejemplo, ha habido un crecimiento constante de emisiones de COV en China desde 1990, a pesar de la reducción de emisiones de los sectores de la vivienda y el transporte desde 2005 (Li y otros, 2019). El aumento está asociado con el crecimiento de la industria y el uso de disolventes, aunque este crecimiento se ha ralentizado con medidas eficaces de control en los sectores de la vivienda y el transporte, especialmente después de que en 2013 se implantase en China el Plan de acción para un aire limpio. China posee una extensa red de vigilancia de COV en las principales



Muestreo de aire en la zona industrial de Kot Lakhpat, Lahore (Pakistán).

regiones fuente (que incluyen la llanura del norte de China, el delta del río Yangtsé y el delta del río de las Perlas) que proporciona una base sólida para evaluar la evolución de las emisiones de COV en China (Guo y otros, 2017).

Incluso cuando las ciudades logran reducir sus niveles de contaminación y mejorar la calidad del aire, pueden llegar a incumplir sus niveles de ozono y otros contaminantes. El transporte transfronterizo es un factor de

confusión adicional en algunas regiones, por ejemplo, cuando las áreas vecinas tienen diferentes niveles de contaminación o de control de emisiones. El resultado es a menudo una combinación compleja de contribuciones de fuentes de COV locales y regionales que varían según el tiempo atmosférico, por ejemplo, con la dirección variable del viento. Determinar las contribuciones relativas de las fuentes de contaminación locales y regionales supone otro reto para el estudio de la calidad del aire.

Actividades de la OMM en calidad del aire urbano y compuestos orgánicos volátiles

La OMM ha adquirido el compromiso mundial de reducir las muertes por contaminación atmosférica en dos tercios para 2030. Para cumplir con este compromiso, la Organización trabaja para mejorar las evidencias observacionales de los niveles de contaminación del aire y proporcionar herramientas para prevenir episodios agudos de esta contaminación.

El Grupo consultivo científico sobre gases reactivos de la Vigilancia de la Atmósfera Global de la OMM (VAG) coordina medidas globales, análisis e investigación de gases traza incluyendo los compuestos orgánicos volátiles (COV). Esta investigación es importante para conocer con más detalle la emisión, formación, interacción y reducción de los contaminantes del aire.

Si bien muchas actividades están relacionadas con mediciones de fondo (resumidas a continuación), también se ha empezado a investigar en ambientes urbanos. El Proyecto de Investigación de la VAG sobre Meteorología y Medioambiente Urbanos está enfocado en el desarrollo de sistemas mejorados de pronóstico de la calidad del aire y contribuye también a una iniciativa más amplia de servicios urbanos que está desarrollando la OMM. En la publicación *Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services* (WMO-No. 1234) (Guía sobre servicios hidrometeorológicos, climáticos y medioambientales urbanos e integrados) se articula una visión para apoyar las ciudades y comunidades sostenibles, cuestión que se ha identificado como uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. La OMM fomenta el desarrollo e implementación de pronósticos y avisos sobre la calidad del aire, y se asocia con el sector sanitario y la OMS para proporcionar

información integrada sobre el tiempo, el clima y el medioambiente.

A finales de la década de 1990, la comunidad de ciencias atmosféricas sugirió combinar las diferentes capacidades observacionales en la VAG para facilitar el acceso a los datos y mejorar la calidad de los mismos. La actual red básica de COV, que contribuye o colabora con la VAG, comprende (Schultz y otros, 2015):

- Una distribución global de observaciones obtenidas del muestreo semanal en matraces en los que los COV medidos incluyen hidrocarburos simples de cadena corta (Helmig y otros, 2016). Esta vigilancia de los COV se basa en la Red global de referencia de medición de gases de efecto invernadero de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA) y comenzó en 2005. Actualmente no está operativa debido a los recortes presupuestarios.
- Observaciones en matraces a largo plazo desde 1984, que incluyen hidrocarburos de cadena corta y halocarburos. Las mediciones las realiza la Universidad de California-Irvine cuatro veces al año (una por estación) en una sección transversal norte-sur de zonas del Pacífico y América (Simpson y otros, 2012).
- Datos aportados por la red del Programa para la vigilancia y la evaluación del transporte de los contaminantes atmosféricos a larga distancia en Europa, desde principios de la década de 1990, que incluyen hidrocarburos de cadena corta (Tørseth y otros, 2012).
- Observaciones continuas *in situ* realizadas en las estaciones de la VAG en Hohenpeissenberg (Alemania), Summit (Groenlandia), Montaña del Pico (Portugal), Rigi y Jungfrauoch (Suiza) y Cabo Verde (Cabo Verde).

Un paso adelante

La contaminación atmosférica severa es un problema ambiental y de salud humana que afecta a las ciudades de todo el mundo aunque con las tecnologías actuales es posible reducirla. Los países que empiezan a contar con sus primeros estándares de calidad del aire pueden aprovecharse de los éxitos y retos de otras regiones. La tecnología de control de emisiones de vehículos y el cambio a combustibles más limpios han sido medidas efectivas en la reducción de las emisiones de los COV del tráfico en muchas ciudades, a pesar del aumento del tamaño del parque móvil. A medida que se reducen las emisiones de las fuentes relacionadas con el transporte, otras emisiones de COV pueden volverse más evidentes, como los COV asociados con disolventes u otros productos químicos volátiles. Los programas simultáneos dirigidos a múltiples fuentes de COV pueden ser apropiados, como las regulaciones dirigidas al tráfico, los disolventes u otras fuentes.

Para alcanzar el objetivo de la reducción de ozono, todos los esfuerzos de mitigación de COV deberían considerar la compleja interacción entre los COV, los óxidos de nitrógeno y el ozono. Además de las medidas de reducción de emisiones, el seguimiento eficaz de la calidad del aire es un componente esencial de la gestión de la contaminación atmosférica. Se recomienda la vigilancia a largo plazo de los COV individuales comunes para rastrear los cambios en la huella de COV de cada ciudad en respuesta a las estrategias de control de emisiones. Mientras tanto, los estudios a corto plazo pueden proporcionar una orientación inicial sobre qué COV son los más responsables de la formación de ozono y de aerosoles orgánicos secundarios.

Referencias

- Anenberg, S., D. Henze, V. Tinney, P. L. Kinney, W. Raich y otros, 2018. Estimates of the global burden of ambient PM_{2.5}, ozone, and NO₂ on asthma incidence and emergency room visits. *Environmental Health Perspectives*, 126(10), doi: 10.1289/EHP3766.
- Barletta, B., I. J. Simpson, N. J. Blake, S. Meinardi, L. K. Emmons y otros, 2017. Characterization of carbon monoxide, methane and nonmethane hydrocarbons in emerging cities of Saudi Arabia and Pakistan and in Singapore. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 74(1):87-113, doi: 10.1007/s10874-016-9343-7.
- Chang, K. L., I. Petropavlovskikh, O. R. Cooper, M. G. Schultz y T. Wang, 2017. Regional trend analysis of surface ozone observations from monitoring networks in eastern North America, Europe and East Asia. *Elementa Science of the Anthropocene*, 5: 50, doi: 10.1525/elementa.243.
- Gentner, D. R., S. H. Jathan, T. D. Gordon, R. Bahreini, D. A. Day y otros, 2017. Review of urban secondary organic aerosol formation from gasoline and diesel motor vehicle emissions. *Environmental Science and Technology*, 51:1074-1093, doi: 10.1021/acs.est.6b04509.
- Guo, H., S. C. Zou, W. Y. Tsai, L. Y. Chan y D. R. Blake, 2011. Emission characteristics of nonmethane hydrocarbons from private cars and taxis at different driving speeds in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 45:2711-2721, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.02.053.
- Guo, H., Z. H. Ling, H. R. Cheng, I. J. Simpson, X. P. Lyu y otros, 2017. Tropospheric volatile organic compounds in China. *Science of the Total Environment*, 574:1021-1043.
- Kado, N. Y., R. A. Okamoto, P. A. Kuzmicky, R. Kobayashi, A. Ayala y otros, 2005. Emissions of toxic pollutants from compressed natural gas and low sulfur diesel-fueled heavy-duty transit buses tested over multiple driving cycles. *Environmental Science and Technology*, 39:7638-7649, doi: 10.1021/es0491127.
- Kumar, R., V.-H. Peuch, J. H. Crawford y G. Brasseur, 2018. Five steps to improve air-quality forecasts. *Nature*, 561:27-29.
- Lewis, A. C., N. Carslaw, P. J. Marriott, R. M. Kinghorn, P. Morrison y otros, 2000. A larger pool of ozone-forming carbon compounds in urban atmospheres. *Nature*, 405:778-781.
- Li, M., Q. Zhang, B. Zheng, D. Tong, Y. Lei y otros, 2019. Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions in China during 1990-2017: drivers, speciation and ozone formation potential. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19:8897-8913, doi: 10.5194/acp-19-8897-2019.
- Lyu, X., H. Guo, I. J. Simpson, S. Meinardi, P. K. K. Louie y otros, 2016. Effectiveness of replacing catalytic converters in LPG-fueled vehicles in Hong Kong. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16:6609-6626, doi: 10.5194/acp-16-6609-2016.

- Lyu, X. P., L. W. Zeng, H. Guo, I. J. Simpson, Z. H. Ling y otros, 2017. Evaluation of the effectiveness of air pollution control measures in Hong Kong. *Environmental Pollution*, 220:87-94, doi: 10.1016/j.envpol.2016.09.025.
- McDonald, B. C., J. A. de Gouw, J. B. Gilman, S. H. Jathar, A. Akherati y otros, 2018. Volatile chemical products emerging as largest petrochemical source of urban organic emissions. *Science*, 359:760-764, doi: 10.1126/science.aaq0524.
- Organización Meteorológica Mundial, 2018. *Boletín de la OMM sobre los gases reactivos*, n° 2: Aspectos más destacados del Programa de Vigilancia de la Atmósfera Global. Ginebra.
- Parrish, D. D., J. Xu, B. Croes y M. Shao, 2016. Air quality improvement in Los Angeles — perspectives for developing cities. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 10(5):11, doi: 10.1007/s11783-016-0859-5.
- Simpson, I. J., O. S. Aburizaiza, A. Siddique, B. Barletta, N. J. Blake y otros, 2014. Air quality in Mecca and surrounding holy places in Saudi Arabia during Hajj: initial survey. *Environmental Science & Technology*, 48:8529-8539, doi: 10.1021/es5017476.
- Von Scheinemsser, E., P. S. Monks y C. Plass-Duelmer, 2010. Global comparison of VOC and CO observations in urban areas. *Atmospheric Environment*, 44:5053-5064.
- Warneke, C., J. A. de Gouw, J. S. Holloway, J. Peischl, T. B. Ryerson y otros, 2012. Multiyear trends in volatile organic compounds in Los Angeles, California: five decades of decreasing emissions. *Journal of Geophysical Research*, 117:D00V17, doi: 10.1029/2012JD017899.
- World Health Organization (WHO) / Organización Mundial de la Salud (OMS), 2013. Health Effects of Particulate Matter: Policy Implications for Countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia. Copenhagen.
- , 2016. Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease. Geneva.
- , 2019. Air pollution, <https://www.who.int/airpollution/en/>.
- Zhao, Y., R. Saleh, G. Saliba, A. A. Presto, T. D. Gordon y otros, 2017. Reducing secondary organic aerosol formation from gasoline vehicle exhaust. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(27):6984-6989, doi: 10.1073/pnas.1629011114.

Referencias para actividades de la OMM sobre calidad del aire urbano y compuestos orgánicos volátiles

- Helmig, D., S. Rossabi, J. Hueber, P. Tans, S. A. Montzka y otros, 2016. Reversal of global atmospheric ethane and propane trends largely due to US oil and natural gas production. *Nature Geoscience*, doi: 10.1038/NGEO2721.
- Simpson, I. J., M. P. S. Andersen, S. Meinardi, L. Bruhwiler, N. J. Blake y otros, 2012. Long-term decline of global atmospheric ethane concentrations and implications for methane. *Nature*, 488(7412):490-494, doi: 10.1038/nature11342.
- Tørseth, K., W. Aas, K. Breivik, A. M. Fjæraa, M. Fiebig y otros, 2012. Introduction to the European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and observed atmospheric composition change during 1972-2009. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(12):5447-5481, doi: 10.5194/acp-12-5447-2012.
- Schultz, M. G., H. Akimoto, J. Bottenheim, B. Buchmann, I. E. Galbally, S. Gilge, D. Helmig, H. Koide, A. C. Lewis, P. C. Novelli, C. Plass-Dülmer, T. B. Ryerson, M. Steinbacher, R. Steinbrecher, O. Tarasova, K. Tørseth, V. Thouret y C. Zellweger, 2015. The Global Atmosphere Watch reactive gases measurement network. *Elementa*, 3: 000067, doi: 10.12952/journal.elementa.000067.